

行政院國家科學委員會專題研究計畫 期中進度報告

尺寸效應對雙釘與群釘拉出行為影響之研究(1/2)

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC94-2211-E-032-008-

執行期間：94 年 08 月 01 日至 95 年 07 月 31 日

執行單位：淡江大學土木工程學系

計畫主持人：洪勇善

共同主持人：吳朝賢

計畫參與人員：紀柏全、朱志峰

報告類型：精簡報告

報告附件：出席國際會議研究心得報告及發表論文

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 95 年 5 月 29 日

摘要

本研究第一階段(本年度)針對四種直徑(9、12、16 及 19 mm)之模型土釘，分別進行單釘及雙釘拉出試驗，探討尺寸效應對拉出阻抗的影響。由單釘試驗結果詮釋土釘表面粗糙因子，並由雙釘拉出試驗探討不同參數對於雙釘拉出行為的影響。試驗結果經分析歸納獲得：(1)尖峰及殘餘視摩擦係數皆隨螺紋牙距增大而增加，粗糙土釘視摩擦係數為光滑土釘之 4~7 倍；粗糙土釘尖峰及殘餘視摩擦係數皆隨直徑增加而遞減，遞減趨勢於直徑 12 mm~16 mm 趨於平緩，光滑土釘則不受直徑影響。(2)雙釘試驗於密間距下，應力有重疊及相互干擾之現象，造成拉出阻抗降低；土釘埋設間距對於尖峰與殘餘拉出力影響顯著，當群釘效率小於 100 % 時，群釘效率與水平間距約呈線性正比關係。(3)雙釘間互制效應及影響範圍受粗糙因子及土釘直徑影響極為明顯；尖峰狀態下，達到 100%群釘效率所需正規化間距 S/D 與粗糙因子成正比關係，與土釘直徑則成反比關係；但殘餘狀態下之群釘效率在目前試驗條件下大多無法達到 100%，表示殘餘狀態下雙釘影響範圍較尖峰時為大。

關鍵詞：土釘、粗糙因子、覆土壓力、拉出阻抗、群釘效率

ABSTRACT

Keywords: soil nailing, roughness factor, overburden pressure, pullout resistance, group efficiency.

The purpose of this study in the first stage is to investigate the pullout behavior of various diameter nails (9, 12, 16 and 19 mm) through the tests of single- and double nails. The conclusions via the tests are summarized: (1) The peak and residual apparent friction coefficients at the soil-nail interface are all increased with increase of the screw pitch, and the apparent friction coefficients of rough nails are 4-7 times greater than that of smooth nails. The peak and residual apparent friction coefficients of rough nails are decreased with increase of the nail diameter and reaches a constant value, but such of smooth nails are not influenced by the nail diameter. (2) Because the stress influence around the nail has the phenomenon of interference and superposition in the experiment of double-nails under dense spacing, the pullout force of nail will reduce. When the group efficiency is smaller than 100%, there would be nearly a linear relation between the group efficiency and the horizontal spacing. (3) The spacing-diameter ratio S/D as peak group efficiency reaches 100% is linear proportion to the surface roughness factor, but it is an inverse proportion to the nail diameter. In present condition of apparatus, residual group efficiency cannot reach 100%.

一、前言

土釘加勁觀念係以密間距(土釘相鄰約 0.5m~1.5m)設置的方式，與現地土壤結合並形成連貫性之擋土塊體，抵抗後方未加勁區之土壤推力。然而，在土釘間距很小的情況下，恐將產生土釘間對周圍土壤應力影響範圍有重疊及相互干擾現象，使得群體之土釘在地層中之行為不同於單根土釘。若設計分析時僅依單根土釘之拉出結果為依據，則可能錯估土釘擋土結構之穩定性。

拉出試驗為探討土釘與土壤間摩擦阻抗最直接的方法，而土釘拉出行為受施工方式和地質條件之影響甚鉅，以現場足尺試驗最為理想。但因現場試驗本身之變數甚多，不易以參數研究的方式進行，且費用昂貴。對於雙釘或群釘之拉出行為，目前國外亦無相關現地拉出試驗之文獻。此外，單釘之相關研究不論模型土釘拉出試驗(Milligan 與 Tei, 1998)或理論模式解析結果(Luo 等人, 2000)，均指出土釘直徑大小影響土釘拉出行為，亦即土釘與土壤間之視摩擦係數將隨尺寸效應影響而改變。換言之，設計上若以小尺寸拉出試驗之極限摩擦阻抗應用於較大尺寸之設計時，則可能錯估真實的拉出阻抗。同理，尺寸效應之問題也將發生於釘與釘應力影響範圍相互重疊且力學機制更加複雜之雙釘與群釘。因此，本研究將分兩階段進行上述課題之探討。第一階段(本年度)以現有之拉出試驗儀(Hong 等人，

2003)，進行單釘與雙釘於不同尺寸下之拉出行為探討，參數包含土釘直徑、表面粗糙度、及水平間距等。第二階段(下一年度)採用現有大型砂箱進行部份修改，分別探討大尺寸單釘摩擦阻抗與中尺寸群釘拉出行為。大尺寸單釘拉出行為透過試驗與理論分析，可強化第一階段尺寸效應之研究成果。另一方面，由於第一階段之雙釘行為探討，對於係多重土釘強固之複合性土體，於實務之應用尚有其限制，因此，利用大型砂箱進行四根(上下各兩根)和五根(上下各兩根而中間一根)土釘同時拉出，以真正模擬群釘行為。特別是受應力影響干擾最為複雜之中間土釘(以五根土釘為例)，亦可經由第一階段所建立的雙釘模式，擴展至群釘模擬以詮釋拉出時之複雜機制，以及應用於分析更大尺寸之群聚效應。

二、研究方法

砂土中土釘的加勁機制主要藉由土釘與土壤間摩擦力的傳遞，使土釘發揮張力以產生束制土體之加勁效果；本研究第一階段透過試驗方式，探討影響雙釘在砂土中拉出行為的因素。

2.1 砂土性質

實驗用砂選用次稜角狀的石英砂，粒徑分佈曲線如圖 1，其中有效粒徑 $D_{10} = 0.22 \text{ mm}$ ，平均粒徑 $D_{50} = 0.28 \text{ mm}$ ，均勻係數 $C_u = 1.63$ ，曲率係數 $C_c = 0.92$ ，為不良級配之砂 (SP)。最大乾密度 16.3 kN/m^3 ，最小乾密度 13.8 kN/m^3 。砂土剪力強度參數之摩擦角以直剪試驗求取，試體採用賈降法配合輕搗方式控制相對密度 70%，分別獲得砂土之尖峰摩擦角 $\phi_p = 37.5^\circ$ 與殘餘摩擦角 $\phi_r = 35^\circ$ 。

2.2 試驗方式

採用 Hong 等人(2003)之拉出試驗儀(圖 2)，分別進行單釘與雙釘試驗。為模擬土釘與土壤間之不同粗糙程度，將已裁好之實心鋁管(直徑分別為 9 mm、12 mm、16 mm 及 19 mm)於表面車上螺紋，螺牙之牙距(牙峰與牙峰水平間距)為 0.5 mm、0.75 mm、1.0 mm。試驗之土釘長徑比 L/D 為 20，砂土相對密度控制 70%，拉出速率 0.1 mm/min 。

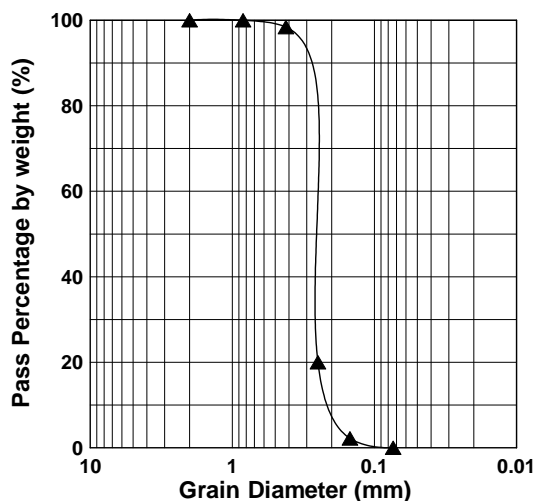


圖 1 試驗用砂之粒徑分佈曲線

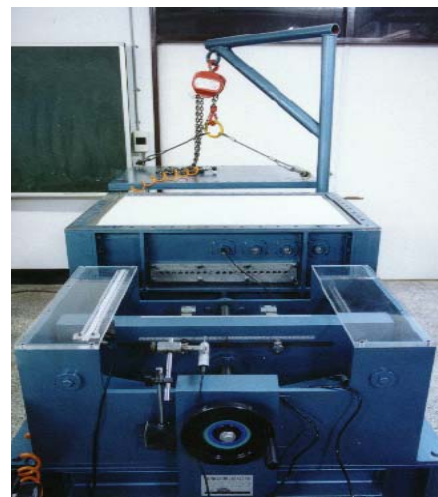


圖 2 拉出試驗儀

三、試驗結果與分析

Milligan 與 Tei(1998)及 Lou 等人(2000)之研究提出土釘拉出行為隨土釘直徑改變而有所差異，故本研究延續 Hong 等人(2003)對於直徑 9mm 模型土釘的試驗，進一步針對另三種較大直徑(12mm、16mm 及 19mm)之土釘進行單釘拉出試驗，探討拉出行為受直徑之影響(即尺寸效應)。另外，依據試驗結果定義土釘表面粗糙因子，同時作為雙釘拉出試驗之對照，並推估雙釘之群釘效率。

3.1 土釘表面螺紋牙距對單釘拉出行為之影響

圖 3 與圖 4 分別為直徑 12mm 與 16mm 之單釘拉出試驗結果；圖中可發現，土釘牙距愈大者，其尖峰拉出力也愈大。此外，粗糙土釘於拉出初期拉出力約略與位移呈線性增加，直至拉出位移 2~3 mm 時拉出力達到尖峰值後即隨位移的增加而降低，表面粗糙之土釘並呈現明顯之跳動現象(峰後滯動現象)，螺紋牙距愈大跳動現象也愈明顯；直至位移約 20 mm 後穩定達到殘餘值，拉出力殘餘值約為尖峰值之 70%~80%。

光滑土釘之拉出力-位移曲線則與粗糙土釘呈現極大之差異，拉出力於位移極小時 (0.1~0.2 mm) 即達到尖峰值，隨即拉出力隨位移增加而降低之趨勢較為平緩，無明顯之峰後滯動現象；拉出力於位移約 5 mm 後即可達到殘餘值，拉出力殘餘值約為尖峰值之 70%~75%。此外，定義土釘與砂土間之視摩擦係數 f ，如下：

$$f = \tau_{max} / \sigma_{mean} \quad (1)$$

其中 τ_{max} 為尖峰剪應力， $\sigma_{mean} = \sigma_v(1+k_0)/2$ 為作用於土釘上之平均正向應力。

圖 5 為尖峰視摩擦係數與螺紋牙距的關係，圖可見尖峰視摩擦係數皆隨牙距的增加而增大，試驗之粗糙土釘尖峰視摩擦係數遠較光滑土釘為大，約為 4~7 倍。因 Hong 等人(2003) 於直徑 9 mm 試驗拉出位移僅達 5 mm，整體拉出行為並未到達殘餘狀態，故本研究並未將其試驗結果之殘餘值納入分析，殘餘視摩擦係數與螺紋牙距之關係如圖 6；由圖可見，於三種直徑之試驗中，殘餘視摩擦係數同樣隨牙距的增加而增大，試驗之粗糙土釘殘餘視摩擦係數遠較光滑土釘為大，亦約為 4~7 倍，此趨勢與尖峰狀態之情形相同。

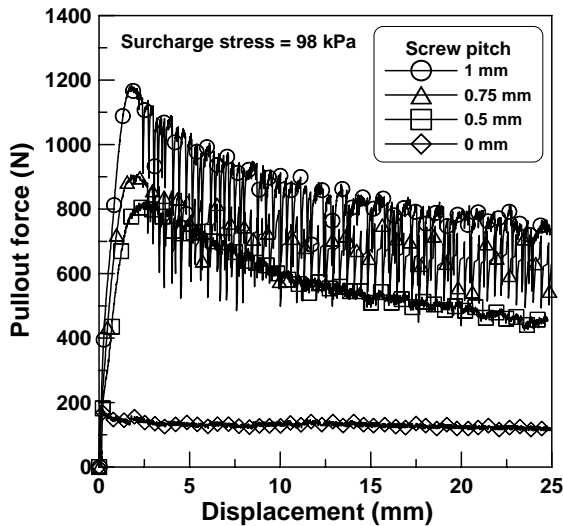


圖 3 直徑 12 mm 單釘之拉出力-位移曲線

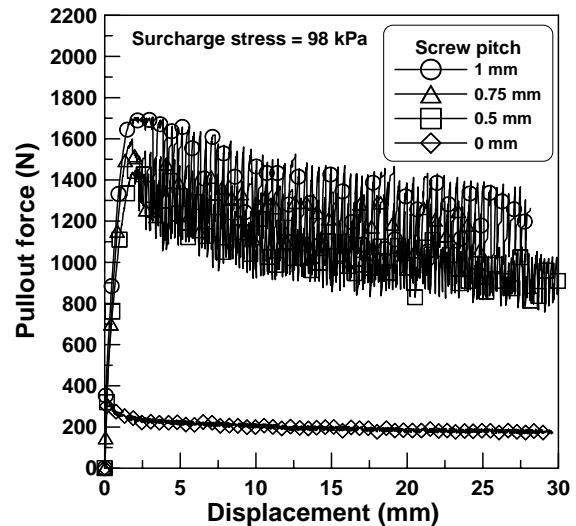


圖 4 直徑 16 mm 單釘之拉出力-位移曲線

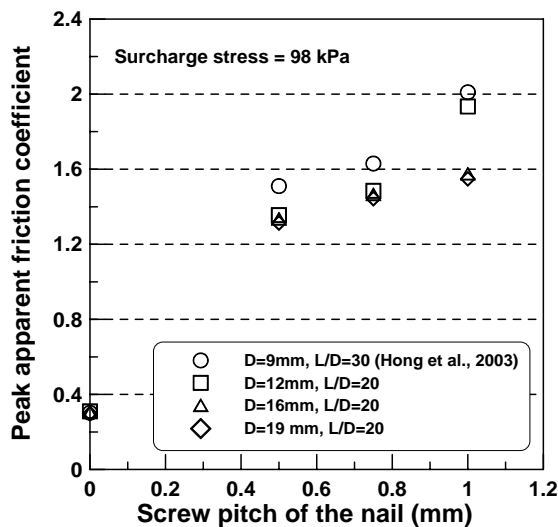


圖 5 螺紋牙距與尖峰視摩擦係數之關係

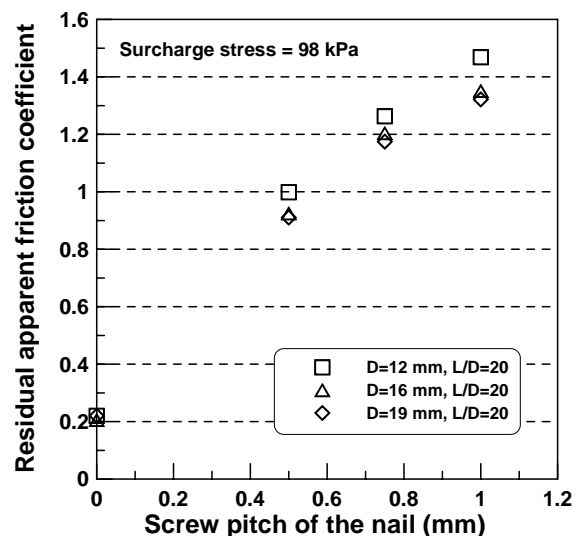


圖 6 螺紋牙距與殘餘視摩擦係數之關係

3.2 土釘直徑對單釘拉出行為之影響

土釘直徑與尖峰視摩擦係數之關係如圖 7，顯示光滑土釘之尖峰視摩擦係數隨土釘直徑增加並無明顯之變化，變化量於 3% 以內；粗糙土釘之尖峰視摩擦係數則隨土釘直徑增加而有下降之趨勢，並以牙距 0.5 mm 和 0.75 mm 於直徑 9mm 至 12mm 時下降最多，最後則趨於平緩並接近定值，此與 Milligan 與 Tei(1998)、Lou 等人(2000)試驗結果相近。

目前第一階段試驗，土釘直徑未超過 20mm，由牙距 0.75 mm 及 0.5 mm 之尖峰視摩擦係數隨直徑變化，顯示尖峰視摩擦係數於直徑 12mm~16mm 線段皆已呈現趨於定值之趨勢，較 Milligan 與 Tei(1998)研究所提出之 20 mm 略小。而牙距 1 mm 與光滑土釘之趨勢則有所差異，牙距 1 mm 之尖峰視摩擦係數於直徑 9 mm 至 12 mm 時變化較小，主要變量發生於 12 mm~16 mm 線段；光滑土釘則明顯不受直徑影響，尖峰視摩擦係數皆維持於 0.3。

圖 8 為殘餘視摩擦係數與土釘直徑之關係，圖中光滑土釘殘餘視摩擦係數隨直徑增加並無明顯變化，變化量於 5% 以內；粗糙土釘之殘餘視摩擦係數則隨直徑增加而降低，但因缺少直徑 9 mm 殘餘視摩擦係數值，造成其變化並不如尖峰視摩擦係數隨直徑變化明顯。

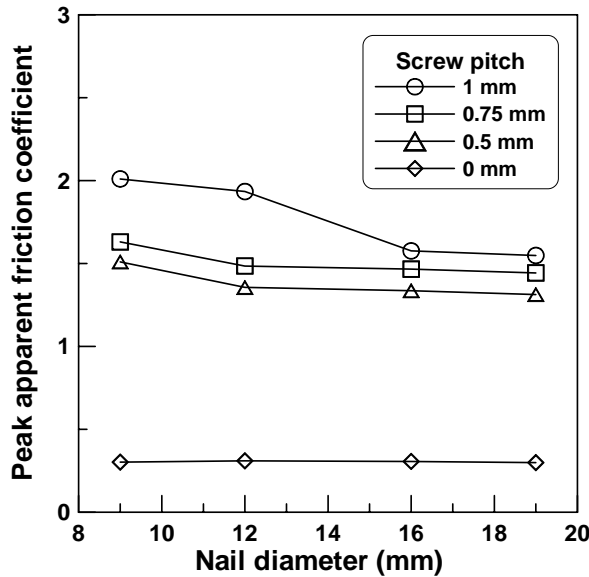


圖 7 土釘直徑與尖峰視摩擦係數之關係

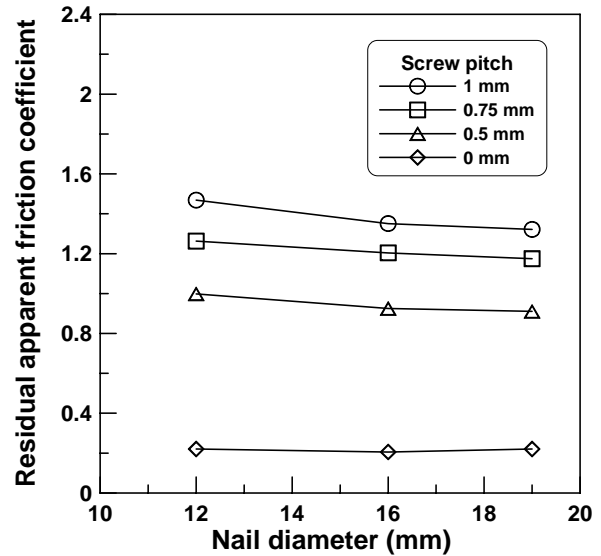


圖 8 土釘直徑與殘餘視摩擦係數之關係

3.3 土釘表面粗糙因子之探討

土釘與土壤界面之摩擦阻抗，是土釘得以發揮作用的基礎，本研究模型土釘試驗中，於土釘表面車以螺紋牙距以模擬砂漿向土壤孔隙滲透所造成表面粗糙現象，土釘表面粗糙程度為影響拉出阻抗最主要之因素，因此表面粗糙因子之探討與定義即顯格外重要。

現階段因單釘拉出試驗僅於編號 315 石英砂中進行，為使所定義之粗糙因子適用於不同砂土，故於分析時整合陳威志(2004)於 315 石英砂($D_{50}=0.28\text{mm}$)及編號 9 砂砂($D_{50}=0.13\text{mm}$)等三種砂土之試驗結果。另外，由前述可知土釘拉出尖峰與殘餘行為趨勢大致相同，考量前人研究對於尖峰行為之探討較為充足完整，故本研究將透過探討各影響參數對於尖峰視摩擦係數之影響，重新詮釋粗糙因子。

Lou 等人(2000)指出，土壤因土釘拉出剪動所產生之膨脹效應為控制土釘拉出阻抗之主要因素；為凸顯此一特徵，本文以視摩擦係數 f 扣除土釘與土壤間界面基本摩擦係數 $\tan\delta$ 所得之係數 f' 作為探討粗糙因子之標的， f' 表示如下：

$$f' = f - \tan \delta \quad (2)$$

其中 δ 為土釘與土壤間之基本摩擦角。此基本摩擦係數 $\tan\delta$ ，於編號 315 石英砂在尖峰與殘餘狀態下分別為 0.3 及 0.25；編號 9 砂砂於尖峰與殘餘狀態下分別為 0.25 及 0.15。

圖 9 為編號 315 石英砂及編號 9 砂砂中 $f'(D_{in}/D_{ex})$ 與 (S_p/D_{50}) 之關係，其中 D_{in} 與 D_{ex}

分別為土釘內徑與外徑(=內徑+2 倍牙深)， S_p 為土釘表面螺紋牙距。由圖可見，當土壤顆粒可嵌入螺紋時， $f'(D_{in}/D_{ex})$ 與 (S_p/D_{50}) 近似成線性正比關係，移項後可得係數 f' 與 $(S_p/D_{50})(D_{ex}/D_{in})$ 成正比。因此，本研究將粗糙因子 R 詮釋如下：

$$R = \left(\frac{S_p}{D_{50}} \right) \left(\frac{D_{ex}}{D_{in}} \right) \quad (3)$$

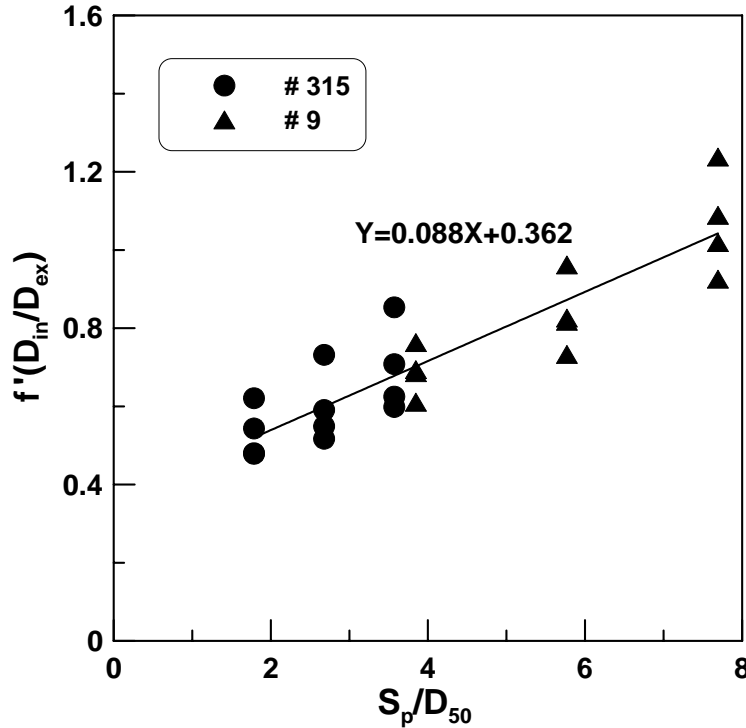


圖 9 $f'(D_{in}/D_{ex})$ 與 S_p/D_{50} 之關係

3.4 土釘埋設間距對雙釘拉出行為之影響

為探討雙釘試驗於尖峰與殘餘狀態之拉出行為，本研究依據 Hong 等人(2003b)定義之群釘效率公式：

$$\eta = (\text{雙釘拉出力之平均值}) / (\text{單釘拉出力}) \quad (4)$$

藉由尖峰與殘餘狀態下之群釘效率變化，探討各參數對雙釘互制效應之影響，並透過回歸分析，歸納出適用於本研究所有土釘直徑之經驗通式，期能供實務界設計時之參考。

圖 10~圖 17、圖 18~圖 25 分別為直徑 12 mm 及 16 mm 土釘於不同間距之拉出力-位移曲線，以及間距與拉出力之關係。由圖中顯示土釘埋設間距較密時，因受互制效應之影響，雙釘尖峰拉出力平均值小於單釘尖峰拉出力，隨間距愈大雙釘尖峰拉出力平均值隨之增加，直至當雙釘尖峰拉出力等於單釘尖峰拉出力時，即尖峰群釘效率 η 達 100%，表示土釘埋設間距已超過土釘之影響範圍，雙釘間無互制影響，故尖峰拉出力平均值即維持定值(與單釘尖峰拉出力相等)，不再隨間距增加而增加。

雙釘殘餘拉出力隨土釘埋設間距變化趨勢與尖峰狀態下相似，受互制效應影響，雙釘殘餘拉出力平均值小於單釘殘餘拉出力，隨間距愈大雙釘殘餘拉出力平均值隨之增加，但由圖 10~圖 25 可發現，除直徑 16 mm、牙距 0.5 mm 之試驗結果殘餘群釘效率可達到 100% 外，其餘殘餘群釘效率皆無法達到 100%。此狀況顯示於殘餘狀態下，雙釘間仍有互制效應存在，但受限於儀器，雙釘試驗配置已達極限，無法再增加埋設間距及試驗組數，造成本研究現階段無法進一步探討雙釘於殘餘狀態下之互制效應變化情形，須待第二階段(第 2 年)完成大型拉出試驗儀後，即可克服目前的瓶頸。

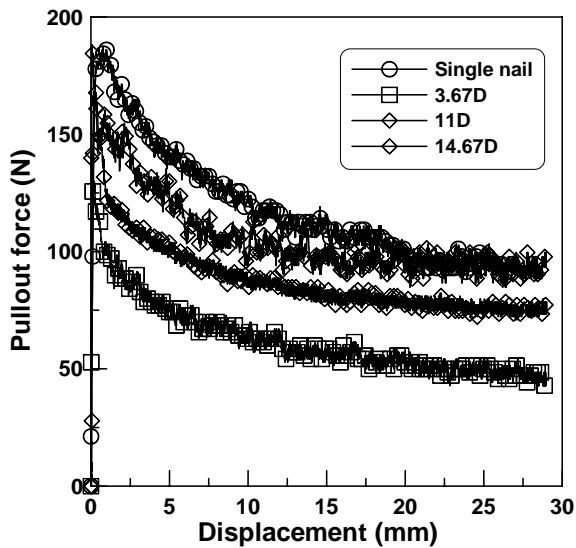


圖 10 直徑 12mm、光滑土釘不同埋設間距之拉出力-位移曲線

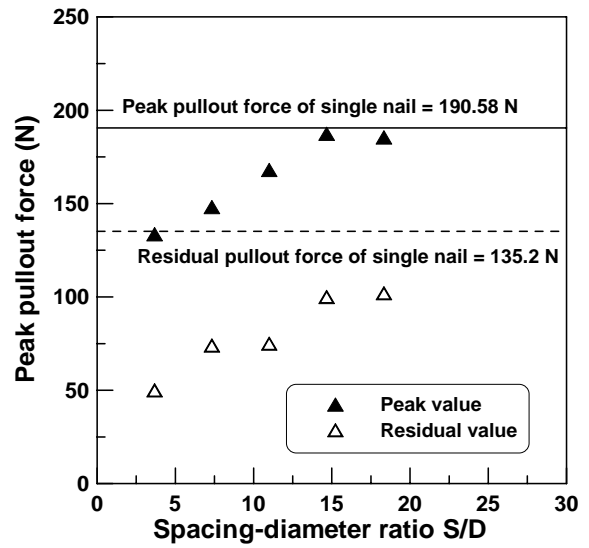


圖 11 直徑 12mm、光滑土釘不同埋設間距與拉出力之關係

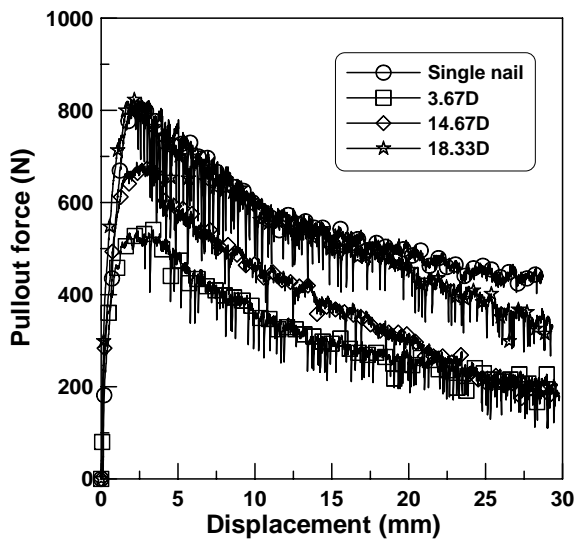


圖 12 直徑 12mm、牙距 0.5mm 土釘不同埋設間距之拉出力-位移曲線

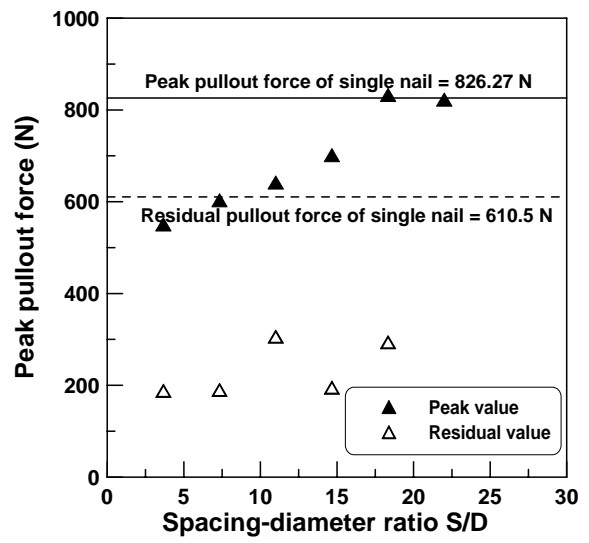


圖 13 直徑 12mm、牙距 0.5mm 土釘不同埋設間距與拉出力之關係

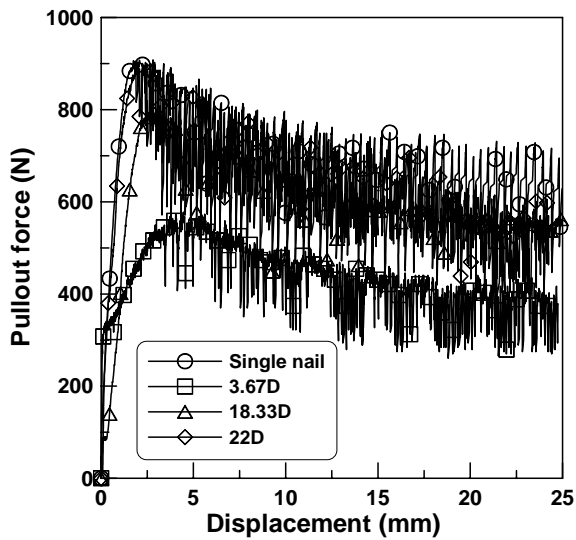


圖 14 直徑 12mm、牙距 0.75mm 土釘不同埋設間距之拉出力-位移曲線

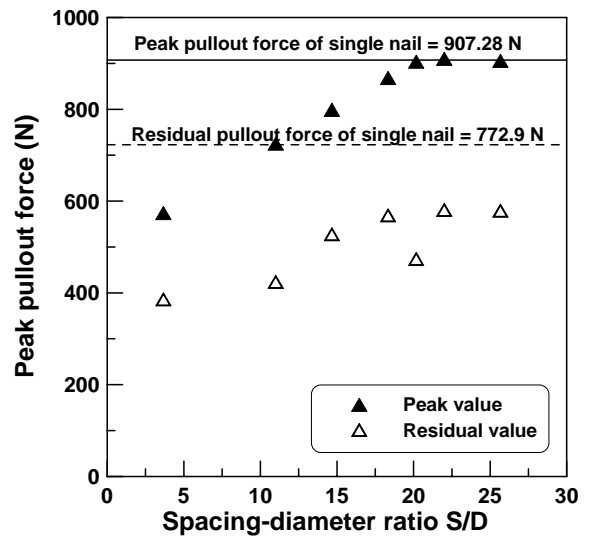


圖 15 直徑 12mm、牙距 0.75mm 土釘不同埋設間距與拉出力之關係

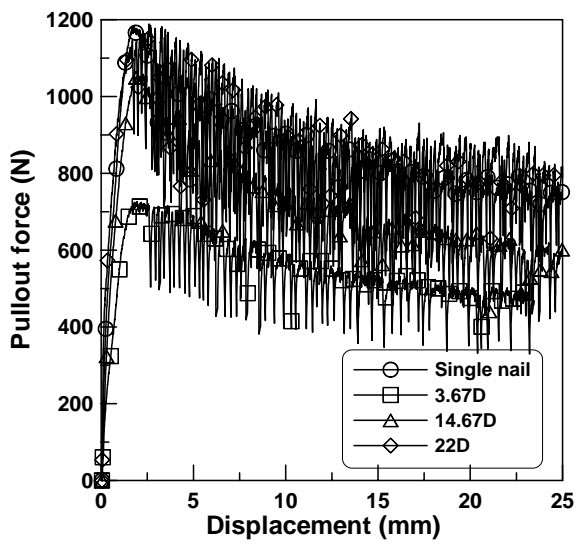


圖 16 直徑 12mm、牙距 1mm 土釘不同埋設間距之拉出力-位移曲線

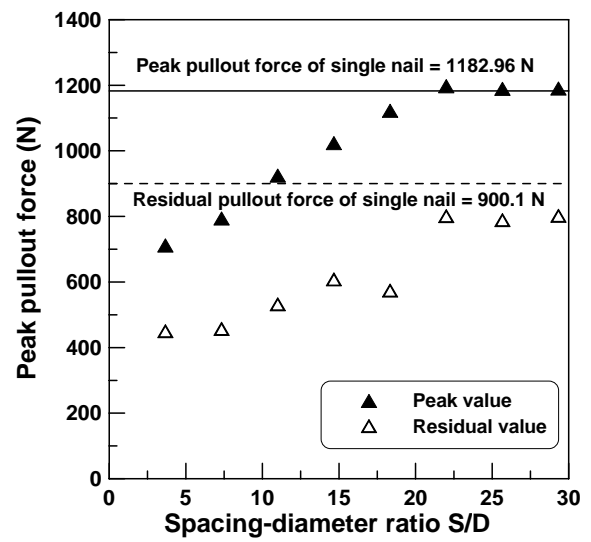


圖 17 直徑 12mm、牙距 1mm 土釘不同埋設間距與拉出力之關係

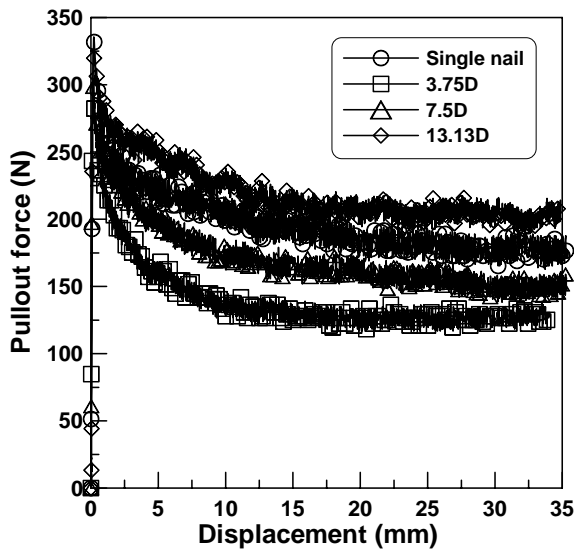


圖 18 直徑 16mm、光滑土釘不同埋設間距之拉出力-位移曲線

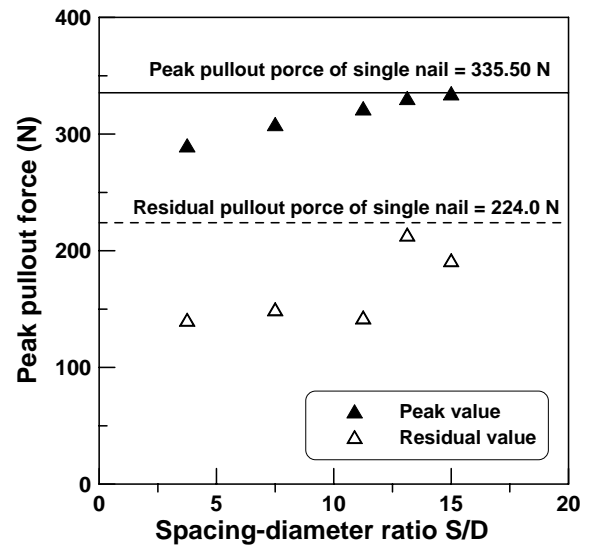


圖 19 直徑 16mm、光滑土釘不同埋設間距與拉出力之關係

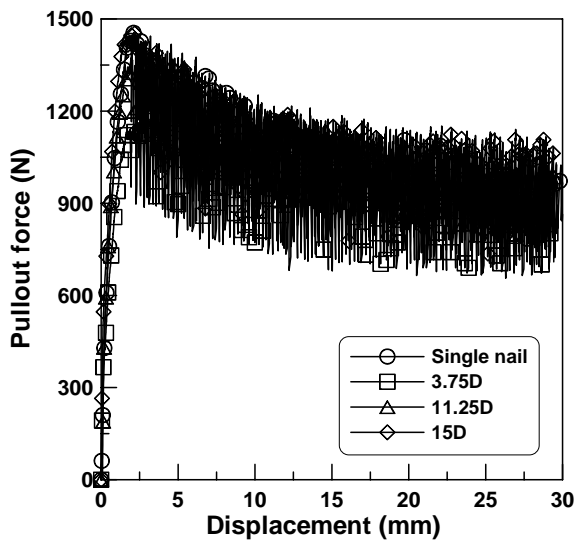


圖 20 直徑 16mm、牙距 0.5mm 土釘不同埋設間距之拉出力-位移曲線

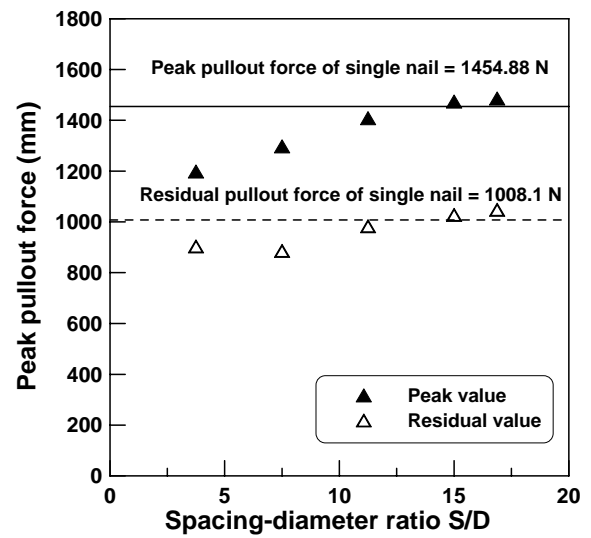


圖 21 直徑 16mm、牙距 0.5mm 土釘不同埋設間距與拉出力之關係

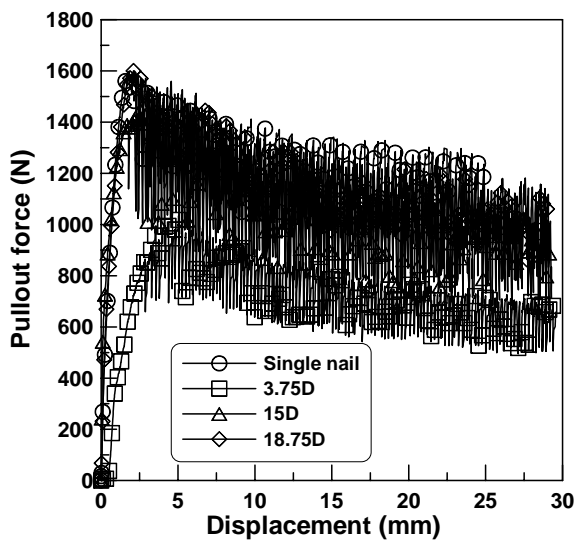


圖 22 直徑 16mm、牙距 0.75mm 土釘不同埋設間距之拉出力-位移曲線

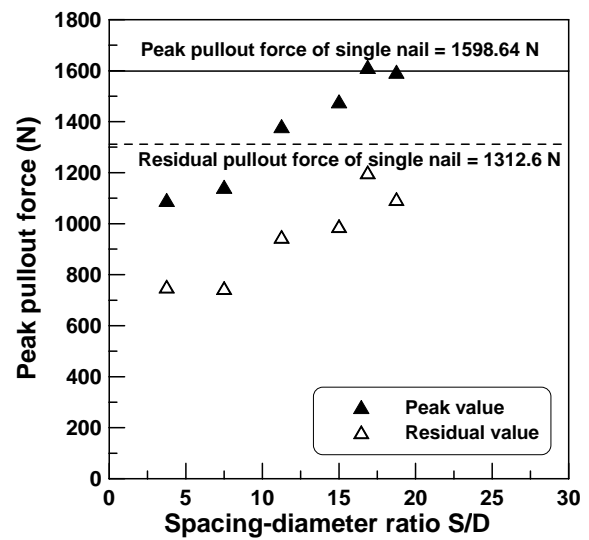


圖 23 直徑 16mm、牙距 0.75mm 土釘不同埋設間距與拉出力之關係

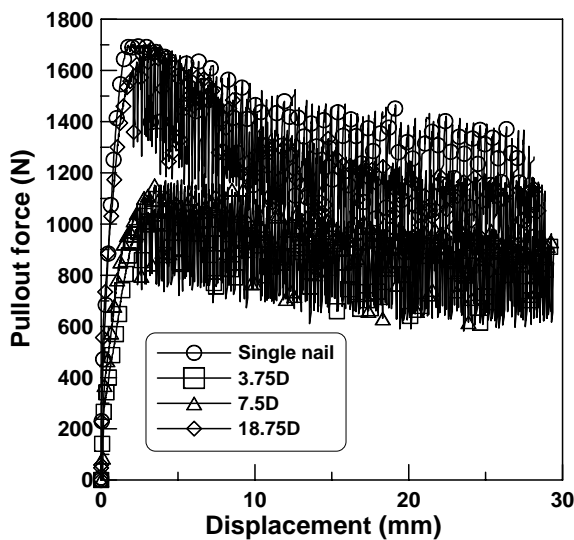


圖 24 直徑 16mm、牙距 1mm 土釘不同埋設間距之拉出力-位移曲線

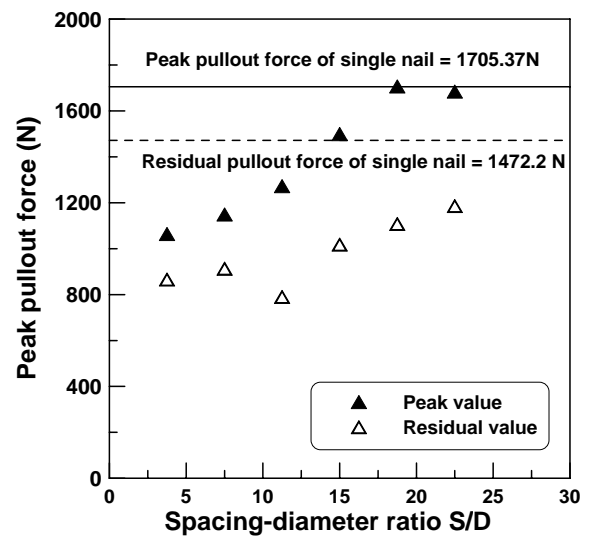


圖 25 直徑 16mm、牙距 1mm 土釘不同埋設間距與拉出力之關係

3.5 土釘表面螺紋牙距對雙釘拉出行為之影響

由單釘試驗結果可知，土釘表面螺紋牙距為影響拉出力最主要的因素，隨牙距愈大，拉出力也愈大。於螺紋牙距對雙釘拉出行為影響之研究中，主要探討螺紋牙距對於雙釘達到 100% 群釘效率時所需正規化間距(S/D)的影響。另，因試驗結果之殘餘群釘效率大多無法達到 100%，故於分析時僅依據尖峰群釘效率釐清雙釘互制行為與各影響參數之關係。

圖 26 與圖 27 分別為直徑 12mm、16mm 雙釘埋設間距與群釘效率之關係，圖中顯示於相同土釘直徑下，隨牙距愈大雙釘達到 100% 群釘效率所需間距 S/D 也愈大。由此可見，土釘表面粗糙程度不只對土釘拉出力有顯著之影響，對於雙釘拉出試驗中土釘達 100% 群釘效率所需間距 S/D 之影響也極為明顯。

3.6 土釘直徑對雙釘拉出行為之影響

圖 28~圖 31 為四種不同牙距中，土釘埋設間距與群釘效率之關係。由本研究之直徑 12 mm 與 16 mm 之試驗結果發現，於相同土釘埋設間距比下，土釘直徑愈大群釘效率也愈大，而雙釘達 100% 群釘效率所需之正規化間距 S/D 則隨直徑增加而有減少之趨勢，即直徑愈大， S/D 愈小。但本研究將 Hong 等人(2003)直徑 9 mm 之試驗結果加入探討時，發現其

並不完全符合本研究試驗之趨勢，於牙距 0.5 mm 與 0.75mm 中並不符合 S/D 隨直徑增加而減少之趨勢，此差異可能導因於 Hong 等人(2003)直徑 9 mm 之雙釘試驗組數較少、土釘埋設間距變量較大，於觀察雙釘達 100%群釘效率所需間距 S/D 時可能產生誤差。除此之外，其試驗結果與本研究之趨勢大致相符。

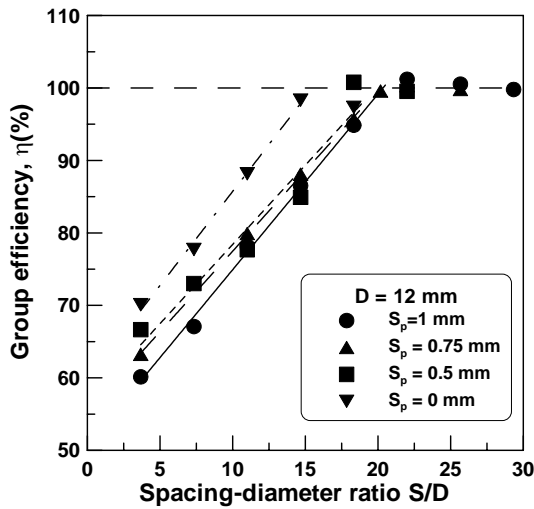


圖 26 直徑 12mm、不同粗糙因子下埋設間距與群釘效率之關係

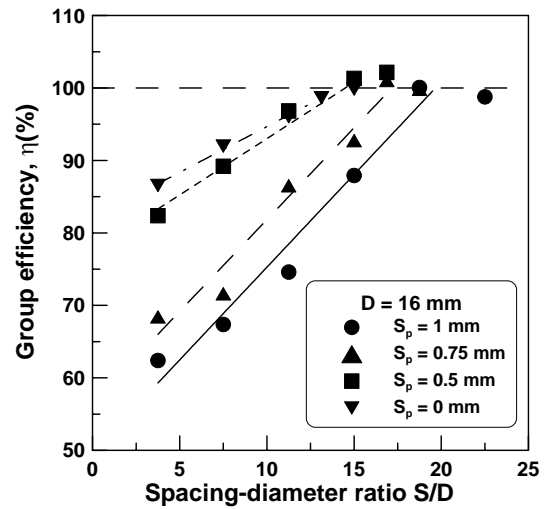


圖 27 直徑 16mm、不同粗糙因子下埋設間距與群釘效率之關係

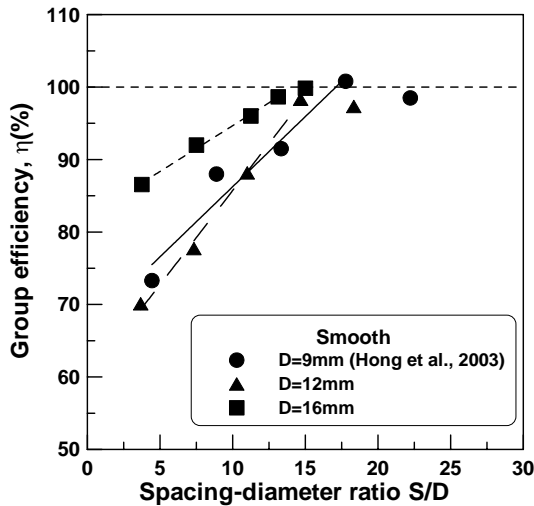


圖 28 光滑土釘、不同直徑下埋設間距與群釘效率之關係

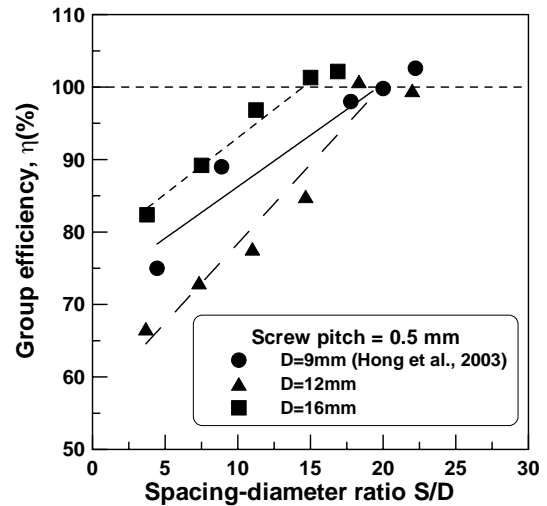


圖 29 牙距 0.5mm、不同直徑下埋設間距與群釘效率之關係

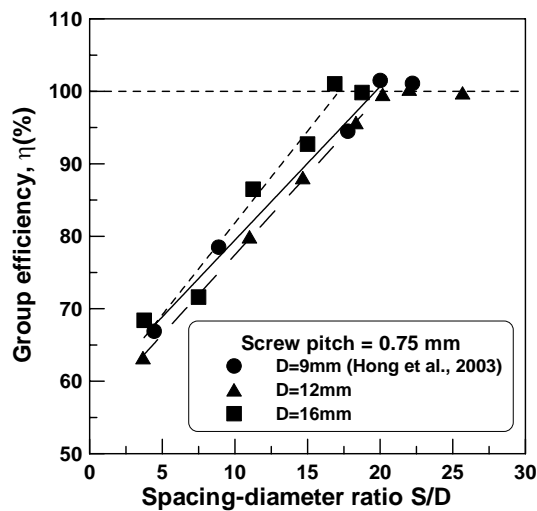


圖 30 牙距 0.75mm、不同直徑下埋設間距與群釘效率之關係

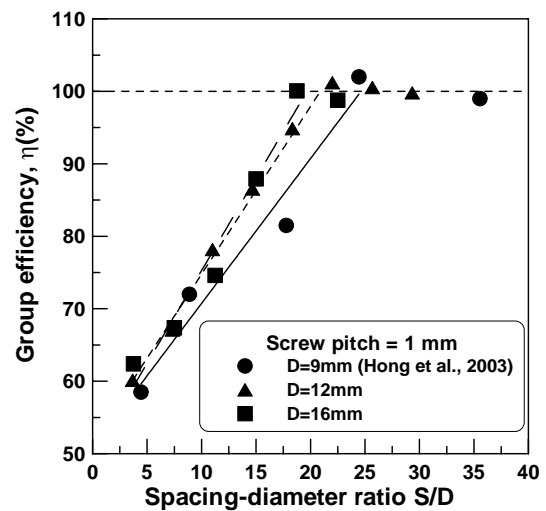


圖 31 牙距 1mm、不同直徑下埋設間距與群釘效率之關係

3.7 雙釘互不干擾所需間距之經驗模式

由前述可知土釘直徑為影響雙釘達 100% 群釘效率所需間距 S/D 之一；即除粗糙因子外，土釘直徑為另一影響土釘互制效應之因素。為探討粗糙因子 R 及土釘直徑 D 兩參數與 S/D 之關係與影響程度，利用多元迴歸方法(multiple-regression-analysis)進行分析。依現階段試驗之數據回歸如下：

$$\frac{S}{D} = 20.2 + 1.64R - 0.47D \quad (5)$$

圖 32 為上述分析之經驗模式與試驗之比較，整體誤差 3.3%。若依直徑分別驗證，則直徑 9 mm、12mm 與 16mm 之預測值與試驗值平均誤差分別為 4.2%、3.9%與 1.8%，由此可見，本研究由多元迴歸分析求得之經驗式對於預測試驗結果可達相當之精確度。另，圖中直徑 19mm 之土釘乃為進一步之試驗結果，檢驗本文所提之雙釘經驗模式，顯示預測值與試驗值相當接近。故，第一階段(第 1 年)雙釘經驗模式可充分滿足直徑 19 mm 以下雙釘拉出行為之變化趨勢，且對於預測雙釘試驗結果也可達到相當之準確度。

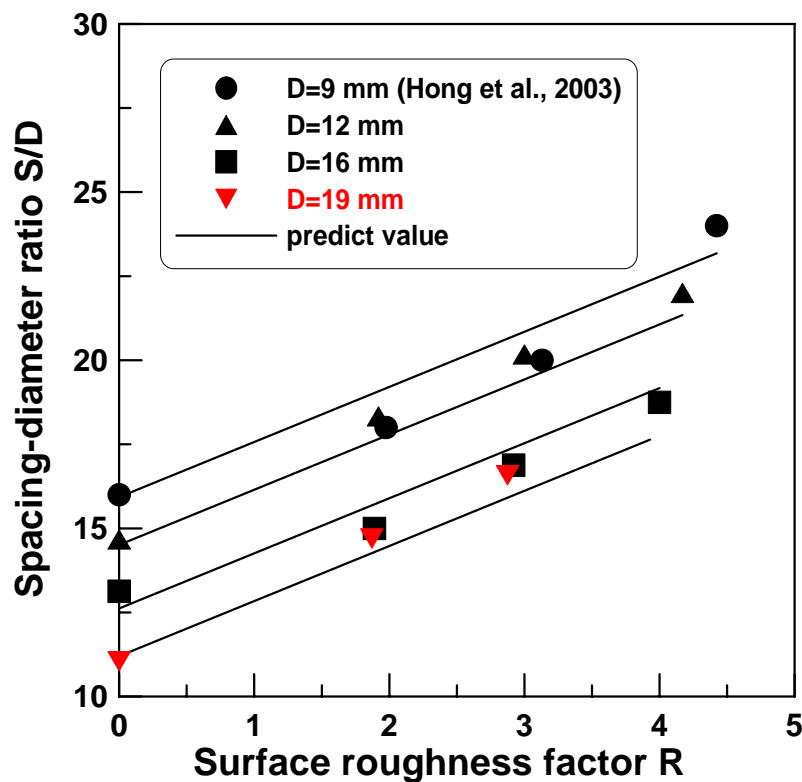


圖 32 雙釘預測式與實驗值之比較

四、結論與成果自評

本研究第一階段以四種不同直徑之土釘分別進行單釘及雙釘試驗，以詮釋尺寸效應對拉出阻抗之影響，並由雙釘試驗結果探討不同參數對於群釘效率的影響。歸納目前研究之結論如下：

1. 由單釘試驗結果顯示，於尖峰狀態下當牙距增加，視摩擦係數也隨之增加，粗糙土釘視摩擦係數遠較光滑土釘為大，約為 4~7 倍。另，隨直徑增加，粗糙土釘之視摩擦係數隨之遞減並趨於一定值，由螺紋牙距 0.75 mm 及 0.5 mm 之結果，視摩擦係數於 9 mm~12 mm 線段大幅降低，直徑 12 mm~19 mm 則趨於定值，較 Milligan 與 Tei(1998)研究所提出之 20 mm 略小，但牙距 1 mm 之結果主要變量則出現於直徑 12 mm~16 mm 線段，與上述兩者相異。而光滑土釘之尖峰視摩擦係數則明顯不受直徑影響，維持定值。在殘餘

狀態下，殘餘視摩擦係數同樣隨牙距增加而增大，粗糙土釘殘餘視摩擦係數約為光滑土釘之 4~7 倍；粗糙土釘殘餘視摩擦係數隨直徑增加而減少，於直徑 16mm~19 mm 線段趨於定值，而光滑土釘殘餘視摩擦係數同樣不受直徑影響，維持定值。

2. 於參數探討及分析時，發現單純以尖峰拉出力求得之視摩擦係數 f 作為探討單釘拉出行為之依據並不完全恰當，土壤因土釘拉出剪動所產生之膨脹效應為控制土釘拉出阻抗之主要因素，為凸顯此一特徵，本文以視摩擦係數 f 扣除土釘與土壤間界面基本摩擦係數所得之係數 f' 作為探討粗糙因子之標的，並依此詮釋粗糙因子 R 。
3. 由雙釘試驗結果可發現，雙釘同時拉出時，兩釘之行為非常相似，包括拉出力-位移曲線、拉出力尖峰值、拉出力殘餘值等。雙釘之尖峰拉出力主要受到埋設間距的影響，因土釘周圍應力有重疊及相互干擾現象，使得土釘拉出力降低，互制效應十分明顯。雙釘之尖峰拉出力隨間距增加而變大，直到超過影響範圍時即維持定值。殘餘拉出力受間距影響之變化趨勢大致與尖峰拉出力相同，隨間距增加而變大，但由試驗結果發現，除直徑 16 mm、牙距 0.5 mm 試驗結果殘餘群釘效率可達到 100% 外，其餘試驗結果的殘餘群釘效率皆無法達到 100%，顯示於殘餘狀態下，雙釘間仍有互制效應存在，但受限於儀器邊界不足，須待第二階段大型拉出試驗儀建構完成，方能進一步探討雙釘於殘餘狀態下之互制效應變化情形。
4. 利用多元迴歸方式建立土釘表面粗糙程度及直徑等因素，對雙釘達到 100% 之群釘效率所需間距 S/D 的經驗公式；與試驗結果對照發現預測值與實際值極為接近(整體誤差 3.3%)，並透過進行更大直徑(19 mm)驗證，經驗式預測值誤差在 4% 以內。
5. 本文為此計畫第一階段之期中報告，已完成第 1 年預定進度約 80%；相信在現有研究基礎下，第 2 年將可解決目前研究的瓶頸，預期研究成果可達國際期刊之水準。此外，今年度需建構完成的大型土釘拉出試驗儀，目前也已大致完成 85%，預計兩個月內即可進行下一階段的試驗。圖 33 與圖 34 分別為儀器改造前與改造後的目前情形。



圖 33 大型砂箱改造前情形



圖 33 大型砂箱改造後目前情形

誌謝

本研究承國科會 NSC 94-2211-E-032-008 計畫之研究經費補助，得以順利執行此研究，特此感謝。

參考文獻

1. 陳威志(2004)，「模型土釘在砂土中之拉出阻抗」，私立淡江大學土木工程研究所，碩士論文，台北。
2. Hong, Y. S., Wu, C. S. and Yang, S. H. (2003), "Pullout resistance of single and double nails in a model sandbox", *Canadian Geotechnical Journal*, October, Vol. 40, No. 5, pp. 1039-1047.
3. Luo, S. Q., Tan, S. A. and Yong, K. Y. (2000), "Pull-out Resistance Mechanism of A Soil Nail Reinforcement in Dilative Soils," *Soils and Foundations*, Japanese Geotechnical Society, Feb., Vol. 40, No. 1, pp. 47-56.

4. Milligan, G. W. E. and Tei, K. (1998), "The Pull-out Resistance of Model Soil Nails," *Soils and Foundations*, Japanese Geotechnical Society, June, Vol. 38, No. 2, pp. 179-190.